

# 다양한 결합 상수에 따른 원자 공진기 계의 에너지 준위 교차 회피 관측

## Observation of Avoided Crossing in a Coupled System of a Single Cold Atom and a Single Cavity Mode with Various Coupling Constants

강성삼, 최영운, 임수인, 김육래, 이재형, 안경원\*  
 서울대학교 물리천문학부 양자광 레이저 연구실  
 \*kwan@phya.snu.ac.kr

이 준위 단일 원자와 공진기의 단일 모드 사이의 결맞은 상호작용은 공진기 양자전기역학 (QED)의 가장 기본적이며 중요한 현상이다. 특히 진공 Rabi 진동에 의한 기준방식 갈라짐(normal mode splitting)은 원자와 공진기 모드의 결합에 의해 나타나는 현상으로 강결합(strong coupling) 조건에서 공진기의 투과 신호가 두 개의 peak을 보이는 특징을 갖는다.<sup>(1)</sup> 단일 원자와 공진기의 결합에 의한 기준 방식 갈라짐을 관측하기 위한 노력이 계속되어 왔으며 Kimble 그룹과 Rempe 그룹에서 최근 레이저냉각 및 포획 기술을 이용하여 단일 원자와 공진기의 상호작용을 관측하는데 성공하였다.<sup>(2)(3)</sup> 냉각된 원자는 공진기와의 상호작용 시간이 길어 강결합 조건에서 원자 한 개에 의한 공진기 투과 신호의 변화를 높은 정밀도로 측정할 수 있다. 본 실험에서는 냉각된 <sup>85</sup>Rb 원자의 여러 전이선을 이용하여 원자-공진기 결합상수를 선택적으로 바꾸면서 단일 원자와 공진기 사이의 상호 작용을 관측하였고, 공진기와 원자 사이의 detuning을 달리 해 가며 기준방식 갈라짐을 측정하였다. 이를 통해 원자 공진기 계의 고유에너지의 실수부와 허수부를 각각 측정할 수 있었다.

실험장치의 기본적인 모습은 그림 1과 같다. 먼저 광자기 포획(magneto optical trap)을 이용하여 공진기 위에 약  $10^4$ 개의 원자를 포획하였다. 공진기는 길이  $155 \mu\text{m}$ , 휘네스  $2.5 \times 10^4$ , 선폭은  $2\kappa=38 \text{ MHz}$ 로 측정되었고 원자와의 결합상수는  $g=16\text{MHz}$ 로 강결합 조건( $g > (\kappa - \gamma)/2$ , 여기서  $2\gamma$ 는 원자전이선의 선폭)을 만족한다. 공진기는 <sup>85</sup>Rb원자의 D-2 전이선에 잠금 되어 원자와 공명을 유지한다. 공진기의 투과 신호는 APD (Avalanche photo diode)와 SPCM (singlephoton counting module)으로 동시에 측정하였다.

원자와 공진기 간의 상호작용의 크기를 결정짓는 결합 상수는 원자의 전이 확률의 크기와 공진기 모드의 부피에 의해 결정된다. 원자의 전이 확률은 두 레벨의 스핀 상태에 따라 다른 값을 가지므로, 조사광 레이저의 편극 방향을  $\sigma+$ , 또는  $\pi$ 로 조절함에 따라서 다른 결합 상수를 얻을 수 있다. 또한 공진기의 교차 모드를 이용함으로써 공진기의 모드 부피를 바꾸어 줄 수 있고, 이 역시 결합 상수를 조절하는 한 가지 방법으로 사용될 수 있다. 본 실험에서는 이 두 가지 방법을 조합하여 공진기와 원자 사이의 결합

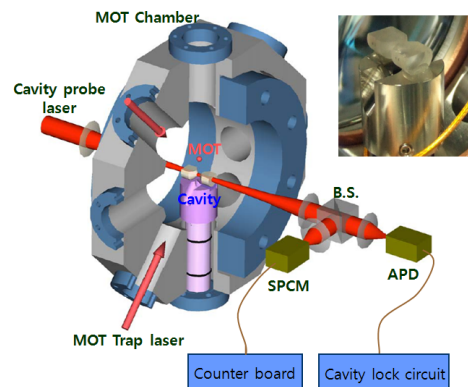


그림 1. 실험 장치의 개략도

상수를 조절하였고, 공진기와 원자가 강결합 조건이 되는 조합과 약결합 조건이 되는 조합을 찾아낼 수 있었다.

원자를 포획한 후 포획 MOT를 끄면 원자는 중력에 의하여 공진기 거울 사이로 떨어지게 되고 모드와 결합하는 원자에 의한 투과 신호의 변화를 관측할 수 있다. 공명 조건에서 원자가 공진기 모드를 통과하면 조사광 레이저의 투과 신호가 그림 2(a)와 같이 측정된다. 신호가 아래쪽으로 갑자기 떨어진 것들은 단일 원자가 공진기 모드와 결합하여 투과 신호를 크게 낮추었기 때문이다. 떨어지는 정도가 다른 것은 모드의 공간 분포에 따라 결합 상수가 달라지므로 원자가 모드의 어느 부분을 지나가느냐에 따라서 그 크기가 결정되기 때문이다. 조사광 레이저와 원자 사이의 detuning을 바꾸어 가며 원자가 공진기를 지날 때 공진기의 투과 신호를 측정하면 그림 2(b)와 같은 기준방식 갈라짐 곡선을 얻을 수 있었다. 그림 2(b)는 원자와 공진기가 공명상태이고, 강결합 조건 ( $g=16\text{MHz}$ )일 때 얻은 결과이며, 투과 신호의 스펙트럼이 원자가 있을 경우 두개로 갈라짐을 쉽게 확인할 수 있다.

공진기와 원자가 공명상태가 아닐 경우에도 그림 2(b)의 측정과 같은 방법으로 기준방식 갈라짐 곡선을 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 각각의 기준방식 갈라짐 곡선을 fitting 함으로써 고유 에너지의 실수부와 허수부를 각각 알아낼 수 있었다. 그림 2(c)는 원자와 공진기가 강결합 조건에 있을 때 원자 - 공진기 사이의 detuning에 따른 고유 에너지의 실수부를 측정된 결과이다. 원자와 공진기가 강결합 조건에 있기에,  $|+\rangle$ 와  $|-\rangle$  상태의 에너지 준위가 서로 교차 하지 않는 avoided level crossing을 관측할 수 있다. 한편, 공진기와 원자의 결합 상수를 바꾸어, 약결합 조건에서 실험한 결과는 그림 2(d)와 같다.  $|+\rangle$ 와  $|-\rangle$  상태의 에너지 준위가 그림 2(c)와는 달리 서로 교차하는 level crossing을 확인할 수 있다. 이와 같은 서로 다른 두 양상의 중간에는 흔히 예외점(exceptional point : EP)이라 불리는 특이점이 존재하고, 이 점의 앞뒤에서 강결합 또는 약결합 조건이 만족된다. 현재까지의 연구에서 이 예외점의 앞뒤에서 원자 공진기 계의 특성을 연구하였다. 앞으로, 결합 상수의 미세 조절을 통해 이러한 특이점의 성질을 연구할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

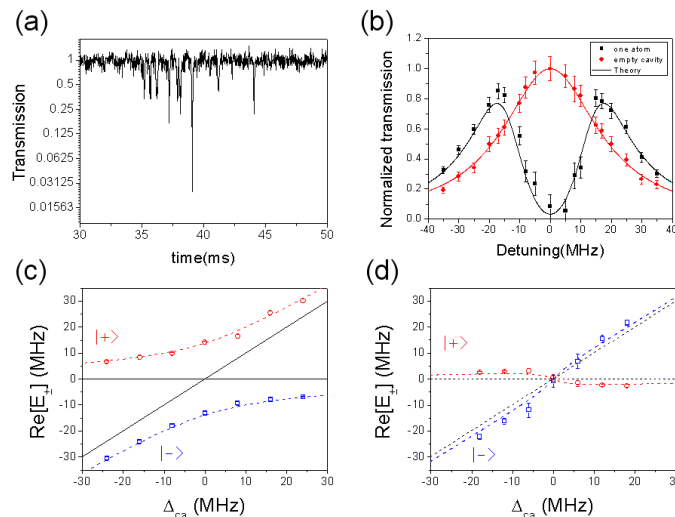


그림 2. (a) 원자와 공진기가 공명 조건일 때의 단일원자 투과 신호. (b) 공명 조건에서의 기준방식 갈라짐 곡선. (c) 강결합 조건( $g=16\text{MHz}$ )에서의 고유 에너지 준위. (d) 약결합 조건( $g=8\text{MHz}$ )에서의 고유 에너지 준위

참고문헌

- (1) *Cavity Quantum Electrodynamics*, Paul R. Berman Ed. (Academic Press, Inc., NY, 1993).
- (2) H. Mabuchi, Q. A. Turchette, M. S. Chapman, and H. J. Kimble, *Opt. Lett.* **21**, 1393 (1996).
- (3) P. Munstermann, T. Fischer, P. W. H. Pinkse, G. Rempe, *Opt. Comm.* **159**, 63 (1999).